

文章编号: 1673-6338(2019)01-0100-05

一种室内导航网络众包构建方法

傅梦颖^{1,2}, 王培晓^{1,2}, 张恒才³, 吴升^{1,2}

(1.福州大学 福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002;

2.海西政务大数据应用协同创新中心, 福建 福州 350002;

3.中国科学院 地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 室内导航网络是室内位置服务的基础,传统人工测绘或基于 CAD 半自动提取等方法时效性较差。室内移动对象众包轨迹数据的出现为室内导航网络构建提供了一种新的解决方案。提出一种室内导航网络众包构建方法。首先提取出用于构建室内导航网络的廊道区域轨迹点;其次通过轨迹点生长融合聚类算法将廊道轨迹点转化为聚类点;最后通过聚类点连接生成室内导航网络。以某商城一楼 2 d 的移动对象轨迹数据进行了实验。结果表明,本文方法提取的室内导航网络准确度较高,能够为室内空间结构快速变化检测和更新提供支持。

关键词: 移动对象轨迹; 轨迹停留点; 生长融合聚类; 导航网络; 室内

中图分类号: P208

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1673-6338.2019.01.019

A Crowdsourcing Method for Indoor Navigation Network

FU Mengying^{1,2}, WANG Peixiao^{1,2}, ZHANG Hengcai³, WU Sheng^{1,2}

(1.Fujian Spatial Information Engineering Research Center, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2.Haixi Government Big Data Application Cooperative Innovation Center, Fuzhou 350002, China;

3.State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Indoor navigation network is the basis of indoor location service. Traditional manual mapping or semi-automatic extraction based on CAD are not efficient. The emergence of crowdsourcing trajectory data for indoor mobile objects provides a new solution for the construction of indoor navigation network. A crowdsourcing method for indoor navigation network is presented in the paper. Firstly, the corridor trajectory points are extracted to construct the indoor navigation network. Secondly, the corridor trajectory points are transformed into clustering points by the fusion clustering algorithm of trajectory point growth. Finally, the indoor navigation network is generated by the connection of clustering points. The experiment was carried out with the trajectory data of moving objects on the first floor of a shopping mall for two days. The results show that the accuracy of road network extracted by using this method is high, and the experimental results can provide data support for rapid change detection and update of indoor spatial structure.

Key words: moving object trajectory; ST-DBSCAN; growing fusion clustering; navigation network; indoor

室内导航网络是室内行人导航、室内路径规划和室内个性化信息服务推荐等室内位置服务的基础^[1]。传统的室内导航网络构建主要通过人工测量和 CAD 平面图提取^[2-3]等方式。人工方式生成路网更新频率低下; CAD 平面图通常是建筑

设计之初的产物,无法反映道路后期变化。因此,以传统方式构建导航网络不利于维护室内导航网络的时效性,进而影响室内位置服务的准确性。

随着室内定位技术迅猛发展,如 WiFi、射频识别、蓝牙、UWB(Ultra-Wideband)^[4]等,内置定

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2019-01-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0502104); 国家自然科学基金面上项目(41771436); 数字福建建设项目(闽发改网数字函(2016)23号)。

作者简介: 傅梦颖(1993-),女,安徽六安人,硕士,主要研究方向为地理信息服务。E-mail: 1429137226@qq.com

通讯作者: 吴升,男,教授。E-mail: ws0110@163.com

位模块的移动终端如智能手机等的用户规模不断扩大,移动互联网的不断发展,室内位置服务应用不断增多^[5]等,室内空间产生了海量移动对象轨迹数据,为室内导航网络自动构建提供了一种新的可能,从而为室内空间结构变化检测与更新提供支持。

目前,基于移动对象轨迹数据构建路网研究多集中于室外空间,常见的有轨迹聚类法^[6-7]、栅格化法^[8-9]、增量融合法^[10-12]、节点连接法^[13-14]等。轨迹聚类法是基于同一路段轨迹具有的空间相似性和临近性,运用聚类算法对轨迹点、线聚类,实现路网提取。栅格化法首先将轨迹点转换为二值化栅格图像,然后运用图像细化算法提取道路骨架线^[15],生成矢量路网地图。增量融合法首先初始化空白地图,逐次将车辆轨迹线添加进空的道路地图上,逐步构造和细化道路图。节点连接法的关键在于道路交叉口的识别,车辆轨迹在转弯处通常会产生较大的速度和方向变化,基于该特征容易识别出交叉口位置。以上方法应用于室内存在两个问题:1) 室外车辆轨迹产生于路网空间,而室内移动对象轨迹产生于自由空间;2) 以上方法多基于轨迹方位角特征,而移动对象轨迹在任意区域都具有不规则的方向,容易影响路网提取结果。

基于此,提出一种室内导航网络众包构建方法。首先通过轨迹简化和轨迹滤选提取出廊道区域轨迹点;其次通过轨迹点生长融合聚类算法将廊道轨迹点转化为概括道路骨架特征的聚类点;最后通过聚类点连接生成室内导航网络。

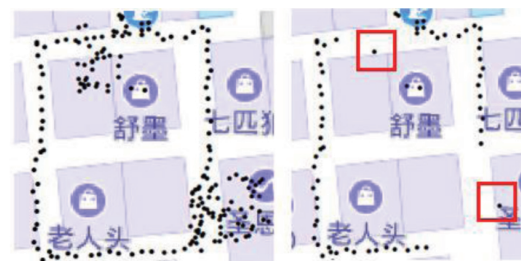
1 廊道轨迹点提取

1.1 个体用户轨迹简化

通常情况下,移动用户在室内廊道区域和设施区域的停留存在差异。相比走廊,行人在设施内会产生更多停留,表现为两种情形:1) 移动对象在同一位置停留较长时间,其轨迹会出现大量时间连续且位置不变的轨迹点;2) 移动对象在一个位置及其周围游荡,其轨迹会出现小范围聚集情况,形成停留簇。针对这两种情况,做轨迹简化处理。首先,利用 ST-DBSCAN 算法^[16]识别出每条轨迹中在连续时间序列下形成的高密轨迹点簇,并以簇集质心 C_i 取代该簇集中的所有轨迹点 $\{P_i | i \in [1, n]\}$,质心表示为

$$C_i(X, Y, T) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i, \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n t_i \right). \quad (1)$$

图1为某用户原始轨迹及其轨迹简化结果,红框里的点是识别出的聚类簇集的质心位置,并去除连续时间下速度为0的轨迹点,只保留一个。



(a) 原始轨迹 (b) 简化结果

图1 轨迹简化

1.2 群体用户轨迹滤选

用户轨迹中停留信息的滤除使得廊道区域和设施内部区域产生了轨迹点密度差异,即廊道区域的轨迹点密度大于设施区域。将研究区域划分为 $m \times n$ 个均匀网格,将网格按行列顺序依次编号为 $\{G_i | i \in [1, m \times n]\}$ 。针对网格 G_i ,统计落入各个网格内的轨迹点数量 N_{G_i} ,使用网格中心点 (X_{G_i}, Y_{G_i}) 替换网格内的所有轨迹点 $\{(x_j^{G_i}, y_j^{G_i}) | j \in [1, N_{G_i}]\}$ 。此时 (X_{G_i}, Y_{G_i}) 具有轨迹点重复度属性即 N_{G_i} 。设定重复度阈值 R_{thr} ,提取满足阈值 R_{thr} 的中心点,就可以得到位于廊道区域的轨迹点。简化后轨迹点与网格中心点的对应关系为 $(x_j^{G_i}, y_j^{G_i}) \rightarrow (X_{G_i}, Y_{G_i}, N_{G_i})$,每个轨迹点唯一对应一个网格中心点坐标, N_{G_i} 表示网格密度。

2 廊道轨迹点聚类

通过廊道轨迹点聚类将廊道轨迹点转化聚类点,通过聚类点连接可以得到包括路段和节点信息的室内导航网络。对廊道轨迹点进行聚类,需要满足3点要求:1) 聚类点能有效概括道路几何特征;2) 能够过滤设施内残留轨迹点;3) 聚类点能够根据原始轨迹时间属性实现连接,生成路网。

据此,提出一种轨迹点生长融合聚类算法,原理为:1) 选取一个未被访问的网格中心点 (X_{G_i}, Y_{G_i}) 。2) 以 (X_{G_i}, Y_{G_i}) 为圆心、 d_m 为半径,判断其邻域范围内的网格中心点是否大于密度阈值 m_{pts} 。若大于,则计算圆内所有网格中心点的加权质心位置 p_c ,存储 p_c ,并将圆内所有的点都标注为已运算。3) 找出距离 (X_{G_i}, Y_{G_i}) 点 $2d_m$ 外最近的未被访问的轨迹点,重复步骤2),直到所有轨迹点都聚类完毕,输出聚类点序列 $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 。4) 将邻域范围外未参与聚类的点归入最近聚类类别里。

对于要求 1), 由于该算法以距离和密度为聚类条件对廊道点聚类, 因此得到的聚类点能够沿着廊道轨迹点的几何形状延伸; 另外以样本点邻域内的加权质心位置作为聚类点位置, 可以考虑邻域内具有不同重复度的中心点对聚类点的不同影响程度, 能够更准确地表达道路中心线的位置。对于要求 2), 该算法是一种基于密度的聚类算法, 因此可以将设施内不满足 m_{pts} 的残余轨迹点有效过滤。对于要求 3), 该算法通过将剩余轨迹点分配类别而使得所有轨迹点都拥有唯一对应的聚类类别, 因此原始轨迹点与所有聚类点都具有潜在对应关系, 这时借助原始轨迹点的时间顺序就可以实现聚类点连接。

聚类过程如图 2 所示。 $G_1(X, Y)$ 为网格中心点, 其邻域内有 5 个点 $\{G_i | i \in [1, 5]\}$, G_1 邻域范围内聚类点即 G_1 邻域所有点 (包括 G_1) 的加权质心位置, 用 $E_0(x_0, y_0)$ 表示, 其计算过程见式 (2)。 G_6 位于 G_1 邻域范围外未能参与聚类, 将其归入距离最近的聚类类别里, 即 $G_6 \in E_0$ 。

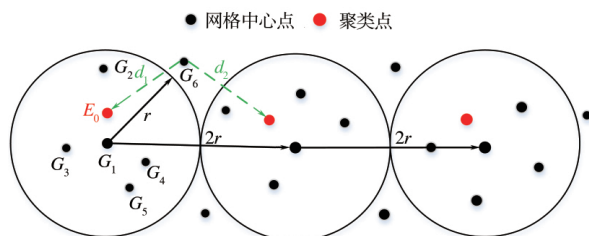


图2 聚类过程示意图

$$X'_i = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i W_i)}{\sum_{i=0}^n W_i}; \quad Y'_i = \frac{\sum_{i=0}^n (Y_i W_i)}{\sum_{i=0}^n W_i} \quad (2)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别表示聚类点的经度和纬度; X_i 、 Y_i 和 W_i 分别表示网格中心点的经度、纬度和重复度权值。

3 聚类点连接与导航网络生成

聚类点连接借助原始轨迹的时间属性实现。移动对象原始轨迹按照时间顺序依次记录, 其反映了道路的几何特征信息。原始轨迹包含了较多设施内的停留点, 因此采用简化后的用户轨迹连接聚类点。

轨迹点生长融合聚类算法对所有廊道轨迹点都分配了唯一对应的聚类类别, 而每个用户的原始轨迹点都有唯一对应的网格, 因此, 聚类点与原始轨迹点具有潜在对应关系。如图 3 所示, 假设轨迹点 {1, 2, 3, 4} 是某用户的连续轨迹点序列,

轨迹点 1 和轨迹点 2 属于网格 a, 轨迹点 3 和轨迹点 4 属于网格 b, 网格 a 的中心点 G_1 属于聚类簇 C_1 , 网格 b 的中心点 G_2 属于聚类簇 C_2 。所以轨迹点 1 和轨迹点 2 属于聚类簇 C_1 , 轨迹点 3 和轨迹点 4 属于聚类簇 C_2 。因此聚类簇 C_1 对应的聚类点 G_1 和聚类簇 C_2 对应的聚类点 G_2 能够按照轨迹点 1、2、3、4 的时间顺序连接。

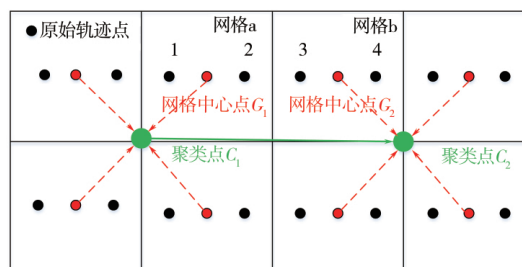


图3 聚类点连接原理

由于网格筛选阶段滤除了不少网格中心点, 造成部分原始轨迹点没有聚类类别, 但这些被滤除的网格中心点主要集中于设施区域, 所以提取出简化轨迹中连续时间下的轨迹点序列 (相邻轨迹点时间间隔不大于 10 s) 作为聚类点连接数据。

聚类点之间的连接次数信息形成一个权重矩阵, 行列都代表聚类点 ID 标号, 行列号下的数值代表对应聚类点之间的连接次数。由于室内导航网络不需要考虑方向, 因此将两两对应的聚类点之间的连接次数求和, 如聚类点 1 到聚类点 2 的连接次数为 10, 聚类点 2 到聚类点 1 的连接次数为 20, 则两点之间的连接次数为 30。考虑可能存在聚类点误连的情况, 设定连接阈值 L_{thred} , 将连接次数大于 L_{thred} 的聚类点进行两两连接, 从而可以得到路网。聚类点之间的连接次数越高, 表明这两个聚类点之间的路段被用户走的次数越多; 反之亦然。

4 实例分析

4.1 实验数据

实验数据为某商场一楼 2 d 的移动对象蓝牙定位数据, 数据采样间隔大多数为 1~2 s, 数据定位精度为 2~3 m, 数据包括用户设备 ID、定位时间、x 坐标、y 坐标、楼层编号这 5 个字段。有效轨迹约 4 000 条, 总轨迹点逾 400 万个。蓝牙定位时存在移动终端信号不稳定、人为关闭信号接收、用户停留等情况^[17], 原始轨迹存在异常、漂移、重复等现象, 需要进行数据清洗: 1) 时间异常轨迹点, 同一用户在同一时间存在大于一个轨迹点, 则只保留一个; 2) 漂移轨迹点, 连续时间序列下个

别偏移过大的轨迹点,则设置偏移距离阈值,将偏移距离大于阈值的轨迹点视为离群值,进行滤除;
3) 冗余轨迹点,同一用户轨迹中时间相邻但坐标相同的轨迹点,进行合并且只保留一个。

4.2 实验结果与分析

图 4 为用户轨迹滤选过程。可以看出,经轨迹简化后设施内部的轨迹点数量大大减少,其密

度远小于廊道区域。经网格滤选后设施内部残留点基本被滤除,轨迹点基本集中在廊道上。廊道轨迹点提取涉及 5 个参数的设置,参考试验区域最小路宽(约 3 m),根据设施点尽可能去除且廊道点尽可能保留的原则,将 ST-DBSCAN 算法中 ε_1 设为 60 s, ε_2 设为 3 m, M_{pts} 设为 30, 网格设为 1 m×1 m, 重复度阈值 R_{thred} 设为 50。

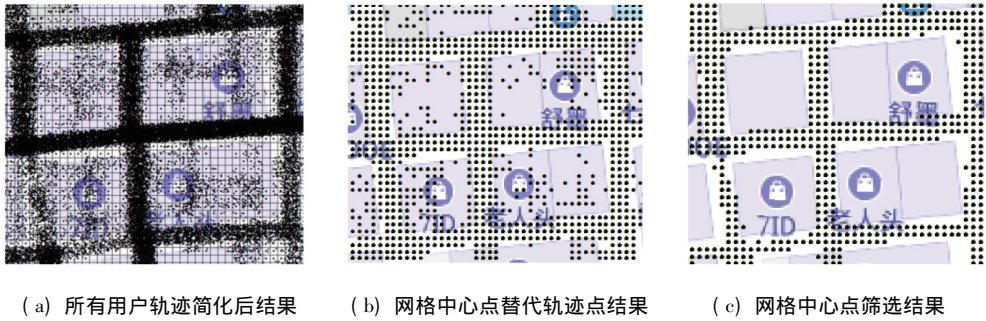


图 4 用户轨迹滤选过程

图 5 是轨迹点生长融合聚类结果。选取不同聚类半径 d 和密度阈值 m_{pts} 进行实验对比,结果发现 d 和 m_{pts} 取值越小,生成的聚类点越多,因此道路特征点会保留更多,生成的廊道道路更加贴合实际。但聚类点多意味着彼此距离更近,容易造成聚类点误连;反之则有利于聚类点连接,但是道路特征点信息容易被弱化,导致聚类点连接后的道路存在一定程度的失真。图 5 是 $d=3$ 、 $m_{pts}=6$ 时聚类点生成结果,该结果有效地概括了室内导航网络几何特征。

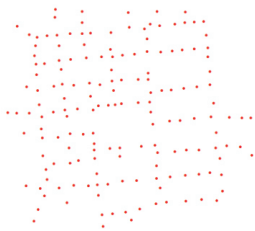


图 5 廊道轨迹点聚类结果

图 6 为记录聚类点之间连接次数的权重矩阵,行列均代表聚类点编号(1, 2, ..., n),编号下的数值代表聚类点之间的连接次数。该矩阵反映了所有路段和节点之间的拓扑关系:若与某聚类点的连接次数大于阈值的聚类点有 2 个,表明该聚类点位于道路上或直角型交叉口处;若与某聚类点的连接次数大于阈值的聚类点有 1 个,表明该聚类点位于道路尽头;若与某聚类点连接次数大于阈值的聚类点不少于 3 个,表明该聚类点为路口交叉点。

图 7 是本文实验结果与商场平面图叠加后的效果图。

聚类点ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	55	0	1	0	0	0	0	0
2	55	0	221	1	0	0	0	0	0
3	0	221	0	6	1	1	0	0	0
4	1	1	6	0	70	7	0	0	0
5	0	0	2	70	0	74	0	0	0
6	0	0	1	7	74	0	454	0	0
7	0	0	0	0	0	454	0	314	0
8	0	0	0	0	0	0	314	0	270
9	0	2	0	0	0	0	0	270	0

图 6 聚类点连接权重矩阵

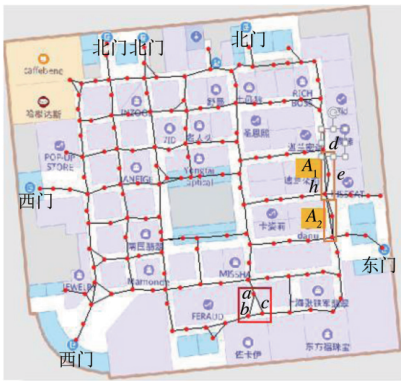


图 7 室内导航网络生成结果

由图 7 可以看出,本文方法生成的导航网络基本覆盖了试验区域数据所及之处的所有道路,准确性较高。但也存在一些连接错误区域,这些区域主要集中在交叉口区域,原因主要是受聚类点位置偏移的影响。以图 7 中 a 、 b 和 c 这 3 点为例,交叉口处有两个聚类点 b 和 c ,但都与实际交叉口位置有所偏移。当移动对象经过 a 点后向南前行时,部分用户会经过 b 点,部分用户会经过 c 点,这就造成 a 点与 b 和 c 都有连接。道路上也出现了两处连接错误,如图 7 中 A_1 和 A_2 处。一

方面是由于聚类点位置有所偏移;另一方面受移动用户走向多变性的影响,部分用户会保持直线方向行走即从聚类点 d 点到 h 点,部分用户会偏移直线方向从 d 点到 e 点再到 h 点,因此会出现连接错误的情况。

5 结论

针对传统室内导航网络构建方法在生产效率和时效性方面的不足,提出一种室内导航网络众包构建方法。其意义在于快速发现道路变化,并给出发生变化道路较为准确的位置和形状,而后,可采用两种方式实现室内导航网络更新:1) 将众包方式构建的导航网络与原有导航网络做融合,实现导航网络更新,这种方式比较适用于室外大规模路网,对于室内小尺度空间,可能存在精度问题;2) 在发现变化信息后,导航地图生产商仍可采用原有测量技术,仅对变化区域做更新,从而加快更新效率,该方式更加满足室内导航网络地图的精度要求。

本文还存在不少不足之处:1) 构建的室内导航网络对于室内小尺度空间而言还不够精确,需要改进方法以进一步提高精确度;2) 在轨迹密度较低区域,得到的室内导航网络提取结果可能存在较大误差,需要进一步提高本研究在稀疏室内轨迹数据的适用性;3) 只提取了二维导航网络,而三维是室内空间的重要特性,故在后续考虑在二维基础上构建室内三维导航网络。

参考文献:

- [1] 卢伟,魏峰远,张硕,等.室内路网模型的构建方法研究与应用[J].导航定位学报,2014,2(4):63-67.
LU W, WEI F Y, ZHANG S, et al. Research and implementation of indoor road network model[J]. Journal of Navigation and Location, 2014, 2(4): 63-67.
- [2] XU D, JIN P, ZHANG X, et al. Extracting indoor spatial objects from CAD models: A database approach[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 273-279.
- [3] 武恩超,张恒才,吴升.基于中轴变换算法的室内外一体化导航路网自动生成方法[J].地球信息科学学报,2018,20(6):22-29.
WU E C, ZHANG H C, WU S. An automatic generation method of indoor and outdoor integrated navigation network based on mid-axis transformation algorithm[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(6): 22-29.
- [4] 刘智伟,李建胜,王安成,等.基于运动捕捉系统的 UWB 室内定位精度标定方法[J].测绘科学技术学报,2017,34(2):147-151.
LIU Z W, LI J S, WANG A C, et al. UWB indoor positioning accuracy calibration method based on motion capture system[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(2): 147-151.
- [5] 王培晓,王海波,傅梦颖,等.室内用户语义位置预测研究[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1689-1698.
WANG P X, WANG H B, FU M Y, et al. Semantic location prediction of indoor users[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(12): 1689-1698.
- [6] ARONOV B, DRIEMEL A, KREVELD M V, et al. Segmentation of trajectories on nonmonotone criteria[J]. ACM Transactions on Algorithms, 2015, 12(2): 1-28.
- [7] LEE J G, HAN J, WHANG K Y. Trajectory clustering: A partition-and-group framework[C]//ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Beijing, 2007: 593-604.
- [8] BIAGIONI J, ERIKSSON J. Map inference in the face of noise and disparity[C]//International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Redondo Beach, California, 2012: 79-88.
- [9] DAVIES J J, BERESFOR A R, HOPPER A. Scalable, distributed, real-time map generation[J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(4): 47-54.
- [10] 杨伟,艾廷华.基于车辆轨迹大数据的道路网更新方法研究[J].计算机研究与发展,2016,53(12):2681-2693.
YANG W, AI T H. Research on road network renewal method based on vehicle trajectory big data[J]. Computer Research and Development, 2016, 53(12): 2681-2693.
- [11] LI J, QIN Q, XIE C, et al. Integrated use of spatial and semantic relationships for extracting road networks from floating car data[J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2012, 19(1): 238-247.
- [12] TANG L, REN C, LIU Z, et al. A road map refinement method using delaunay triangulation for big trace data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(2): 45.
- [13] CHEN D, GUIBAS L J, HERSHBERGER J, et al. Road network reconstruction for organizing paths[C]//ACM-Siam Symposium on Discrete Algorithms. Austin, Texas, 2010: 1309-1320.
- [14] AHMED M, KARAGIORGOU S, PFOSE D, et al. A comparison and evaluation of map construction algorithms using vehicle tracking data[J]. Geoinformatica, 2015, 19(3): 601-632.
- [15] 孔月萍,万晨,张跃鹏,等.栅格数据中面状地物的骨架线提取方法[J].测绘科学技术学报,2017,34(3):311-314.
KONG Y P, WAN C, ZHANG Y P, et al. Skeleton line extraction method of surface objects in grid data[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(3): 311-314.
- [16] BIRANT D, KUTA. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data[J]. Data & Knowledge Engineering, 2007, 60(1): 208-221.
- [17] JIN P, CUI T, WANG Q, et al. Effective similarity search on indoor moving-object trajectories[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 181-197.

责任编辑 王 净